doi:10.13866/j.azr.2019.03.03

黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素①

裴志林[1,2]， 杨勤科[1,3]， 王春梅[3]， 庞国伟[3]， 杨力华[1,2]
（1. 中国科学院水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；2. 中国科学院大学，北京 100049；
3. 西北大学城市与环境学院，陕西 西安 710127）

摘 要： 采用2000—2015年MODIS1M NDVI数据计算黄河上游年最大植被覆盖度（*FVC*），了解空间分布状况及变化特征；同时，采用了一种基于统计学原理的地理探测器模型，考虑非气候类环境因素、气候类环境因素和人类活动因素，使用相应的代理变量对黄河上游*FVC*空间分布的影响因素做定量研究。研究表明：① 黄河上游*FVC*总体上以改善为主，空间分布特征变化不大；② 单因子方面，降水量（q值0.669）是该地区*FVC*空间分布的主要影响因素，其他因子的影响作用存在区域差异；③ 降水分别和土壤类型、土地利用方式的交互作用（q值0.777、0.775）对研究区*FVC*空间分布起主导作用，土壤类型和土地利用的影响作用在一定高程、降水条件下才得以体现；④ 总体上，气候类环境因素 > 非气候类环境因素 > 人类活动因素，人类活动在与降水等环境因子的共同作用能够更充分地解释*FVC*空间分布；⑤ 对研究区的生态恢复应重点放在降水的充分利用和土地利用方式改进等方面。

关键词： 植被覆盖度（*FVC*）；空间分异性；影响因素；地理探测器；黄河上游

植被是联系土壤、水体和大气的纽带，也是地表生物赖以生存的基础，在保持水土、维持生态系统稳定和调节气候等方面具有重要作用[1]。植被覆盖度（*FVC*）是衡量生态环境的重要指标，直接关系到人类的生存环境和生活质量，随着人们对生态环境的日益重视，*FVC*的空间分布特征和影响因素越来越引发人们的关注[2]。

黄河流域主要分布在干旱和半干旱地区，生态环境较为脆弱，是我国开展水土保持措施的重点区域。黄河上游主要是指黄河流域的源区至内蒙古托克托县河口村（原名为河口镇）部分。该区域生境条件复杂多变，各主要植被类型分布地段的自然地理因素及其组合的过渡性和区域分异明显[3]。从黄河流域植物生长总体状况来看，该地区生态保护和水土保持措施取得了一定的效果，植物生长状况逐渐改善[4-6]；并且在气候和人类活动的共同作用下，河水中推移质泥沙含量逐渐减少，达到历史上较低的水平[7]。

使用遥感影像探究植被覆盖状况是一种经济且普遍的做法，植被归一化指数（*NDVI*）及其基础上计算的*FVC*，可以很好地反映植物生长的繁茂程度，在以往涉及植被的研究中得到广泛的应用[8-9]。陈登魁等[10]利用GIMMS NDVI 3g+数据探讨了1982—2015年可可西里地区*NDVI*的空间分布特征和变化趋势。Cao等[6]则将相关系数、Theil-Sen趋势分析和Mann-Kendall检验结合起来对土壤类型、土壤水分、植被类型等进行研究，并考虑了人为因素的作用，探究影响植被空间分布的因素。

地理探测器模型（http://www.geodetector.org/），是一种基于空间异质性的研究方法，该模型的原理是基于统计学原理的空间方差分析，通过分析层内方差与层间方差的差异定量表达研究对象空间分异性。可以定量探测表达某一时空现象的主要驱动因子以及不同驱动因子之间交互作用[11]，与其他空间异质性探测工具相比地理探测器具有更高的解释效率[12]。Du等[13-14]以*FVC*空间特征为研究指标，使用该模型在沙漠化成因中的研究表明，地理探测器适用于*FVC*空间分布的研究，且能够得到有意义的结论，同时地理探测器在地理分界线探讨[15-16]、生态适宜性评价[17]、人文地理研究[18-19]、经济增长空间分异[20]、疾病传播及成因分析[21-23]等方面也得到广泛的应用。

① **收稿日期：** 2018-07-22； **修订日期：** 2018-12-04
基金项目： 中国科学院战略性先导科技专项（XDA20040202）；陕西省教育厅科学研究计划项目（15JK1725）资助
作者简介： 裴志林（1993-），男，硕士研究生，主要研究方向为水土保持监测. E-mail: peizhilin16@mails.ucas.edu.cn
通信作者： 杨勤科. E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

尽管一些科研工作者已经对本研究区 *FVC* 空间分布特征作了一定的研究,但是之前的研究只阐述了 *FVC* 空间分布特点,对于空间分布影响因素的研究则少有涉及,或者只考虑某几个主观认定的影响因素,而没有综合考虑环境因素和人为因素的共同作用,更没有进行定量的研究。本文采用了王劲峰等提出的地理探测器模型,以黄河上游的累年平均 *FVC* 为因变量,以气候类环境因素、非气候类环境因素和人类活动因素等 3 大类共 12 个因子为自变量,利用地理探测器的 4 个探测器(分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测)对黄河上游 *FVC* 空间分布的影响因素进行定量的研究。

1 研究区概况

本文的研究区域为黄河上游流域(图 1),边界范围由杜鹤强以 SRTM-DEM 与 ASTER-GEDEM 数据集为数据源,利用河道烧录法与河道标量法提取(http://westdc.westgis.ac.cn/)。区域范围自黄河源区至内蒙古托克托县河口村,横跨青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古 5 个省(自治区),面积 5.39 × 10^5 km^2,地理位置为 96°2′ ~ 111°15′ E,32°20′ ~ 41°45′N。研究区地势总体西高东低,土壤类型主要以草甸土、草毡土、寒漠土、栗钙土、灰褐土等为主;该地区由于其独特的地理位置、大气环流及地形地貌特征表现为温性、寒温性和高寒 3 种热量带相互交错的特点。植被类型主要包括温带典型草原、高寒草甸、高寒草原和荒漠草原以及灌丛、森林等,以草地为主[3]。

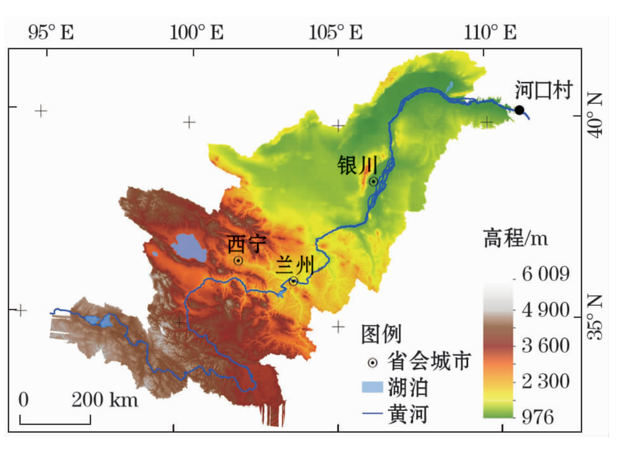


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Geographical location and topography of the study area

2 数据与方法

2.1 驱动因子的确定

黄河上游地区由于其独特的地理环境条件,使影响 *FVC* 空间分布的因素较为复杂。一般来说,*FVC* 空间分布的直接决定因素(Z)包括环境因素和人类活动因素,为了对比地形土壤等因子和气候因子对 *FVC* 空间分布的影响,本文从气候类环境因素(降水、气温等)和非气候类环境因素(地形、土壤等)方面考虑,对于每一类影响因素选取相应的代理变量(X)。其中非气候类环境因素使用土壤类型、表土结构、高程和坡度等 4 个代理变量;气候类环境因素选用累积年平均气温、累积年平均降水量、累积年平均湿度、累积年平均风速和累积年平均气压等 5 个代理变量;人类活动因素一般不容易定量表示,但是考虑到人类对于植被的影响主要与当地的人口、经济状况和土地利用方式有关,所以选用人口密度、人均地区生产总值(地区 GDP)和土地利用方式等 3 个代理变量[13](图 2)。

2.2 数据来源与处理

由于本文研究区横跨干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区,能够找到纯植被像元和纯裸土像元,满足使用像元二分法反演植被覆盖度(*FVC*)的条件[24]。所以,可以使用像元二分法基于 *NDVI* 遥感数据计算研究区 *FVC*。选取 2000—2015 年空间分辨率为 500 m 的 MODIS1M 月值产品(http://www.gscloud.cn/),选取每年植物生长季(4—10 月)的 *NDVI* 数据计算年内最大 *NDVI* 值,然后使用以下公式计算年内最大植被覆盖度[25]:

$$FVC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})} \quad (1)$$

式中:*NDVI* 为像元实际值;$NDVI_{soil}$ 为地表全部被裸土覆盖所对应的 *NDVI* 值;$NDVI_{veg}$ 为地表全部被植被所覆盖对应的 *NDVI* 值。采用生长季影像样区抽样的方法进行了精度验证,在 0.01 显著水平下满足精度要求。

非气候类环境因素中的高程数据来源于 90 m 分辨率的 SRTM DEM 数据,坡度则基于 DEM 使用 GIS 软件生成,为了避免坡度在低分辨率下发生衰减,坡度栅格空间分辨率为 90 m。土壤类型及表土结构数据来源于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)。

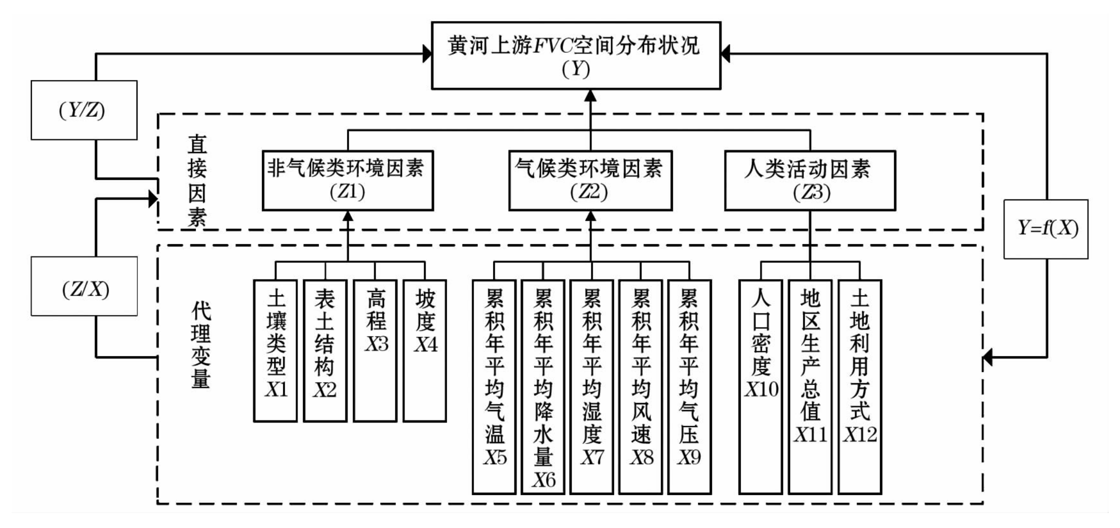


图2 黄河上游 *FVC* 空间分布特征直接因素及其代理变量

Fig. 2 Direct determinants and their proxy variables concerning the *FVC* spatial distribution in the upper reaches of the Yellow River

气候类环境因素数据使用了中国地面累积年值数据集(1981—2010 年),由国家气象科学数据共享服务平台(http:/data. cma. cn/site/index. html)提供。采用研究区及周边的 385 个研究台站的气象资料,根据气象数据具有较大的空间相关性的特点,使用薄板样条函数方法[26]和 Kring 方法[27]对气象数据进行插值。考虑到高程对降水和气温的影响,基于薄板样条函数理论以 DEM 为协变量,使用 ANUSPLIN 软件对累积年平均气温和年平均降水量进行插值;而对其他气象数据,使用了 Kring 方法进行了插值,以上插值结果的空间分辨率均为 1 km。

人类活动因素中的人口密度和人均地区生产总值等数据来源于 2010 年中国区域统计年鉴,以县为单位进行统计并使用 GIS 软件进行了空间关联;土地利用方式数据来源于中国 2015 年 1 km 土地利用遥感监测数据,根据 LUCC 分类体系,将土地利用方式分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地和其他土地等 7 个类别。

地理探测器的因变量需要分类数据,所以除土壤类型、表土结构和土地利用方式等变量不需要处理外,其他代理变量需要进行重分类。其中使用专家知识对高程进行重分类为 5 类;使用自然断点法对其他剩余代理变量进行重分类,分类数目为 4 或 5 类。

首先对 385 个研究台站气候因素中驱动因子的观测值进行插值处理,之后和其他的驱动因子一起进行重分类。利用 ArcGIS 10.4中的渔网工具将研

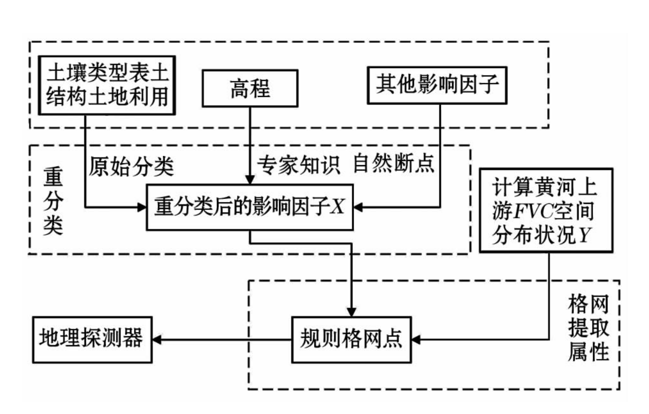


图3 数据处理流程

Fig. 3 Data processing flow

究区划分为 10 km × 10 km 的研究单元,在每个研究单元中心布设样本点提取属性,从而将 *X* 和 *Y* 之间的属性值进行匹配。最后将样本点提取的 *X* 和 *Y* 的属性值表代入地理探测器进行处理(数据处理流程如图 3)。

2.3 地理探测器模型简介

地理探测器模型是一种研究空间分异性的工具。在本研究中,地理探测器可以用来定量分析黄河上游地区 *FVC* 空间分布影响因素以及确定不同影响因素的交互影响作用。

地理探测器模型的原理如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum N_h \sigma_h^2 \qquad (2)$$

式中:q 为空间分异性的指标,用来度量自变量对因变量的解释程度;σ^2 为指标的方差;h 为变量的分区,$h = 1,2,3,\cdots,L$,L 表示分区数目。$q \in [0, 1]$,q

的大小反映了空间分异的程度,q 值越大,表示空间分层异质性越强,反之则空间分布的随机性越强。当 $q=0$ 时指示研究对象不存在空间异质性;当 $q=1$ 时表示具有完美的空间异质性[11]。地理探测器主要适用于寻找因变量的解释变量,即因变量驱动因子,其优势在于评价指标 q 值表征了因子解释力的大小,即影响因素 X 解释了 $100\times q\%$ 的 *FVC* 的空间分布,q 值越大,解释程度越高,该因子对因变量的影响也就越大。

3 结果及分析

3.1 黄河上游植被覆盖空间分布状况

使用 2000—2015 年生长季(4—10 月)月值 *NDVI* 数据提取每年最大 *NDVI* 值和 *FVC* 值,得到年 *FVC* 变化拟合曲线(图 4a,0.05 显著水平)和累积年平均 *FVC*(图 4b)。就植被覆盖度变化而言,近年来,研究区 *FVC* 虽有波动,但主要表现为稳定或增加,局部地区表现为减少(图 4e,阈值 -0.1、0.1)。

从空间分布来看,研究区 2000 年和 2015 年 *FVC*(图 4c、4d)在空间分布上并无明显变化,所以选择年最大 *FVC* 的累积年平均值表示空间分布特征。全区总体上,西南部植被覆盖度较高,而东北部及中部地区除河套平原、宁夏平原和黄河沿线外,植被覆盖率相对较低(图 4b)。主要原因在于,西南部地区分布有阿尼玛卿山和巴颜喀拉山等山系,海拔相对较高(图 5g),主要的植被类型为森林、草地等(图 5l),具有较高的植被覆盖度;而中部地区为宁夏平原,多种植农作物,植被覆盖度相对较低;中部和东北部地区由于腾格里沙漠、毛乌素沙漠、河东沙

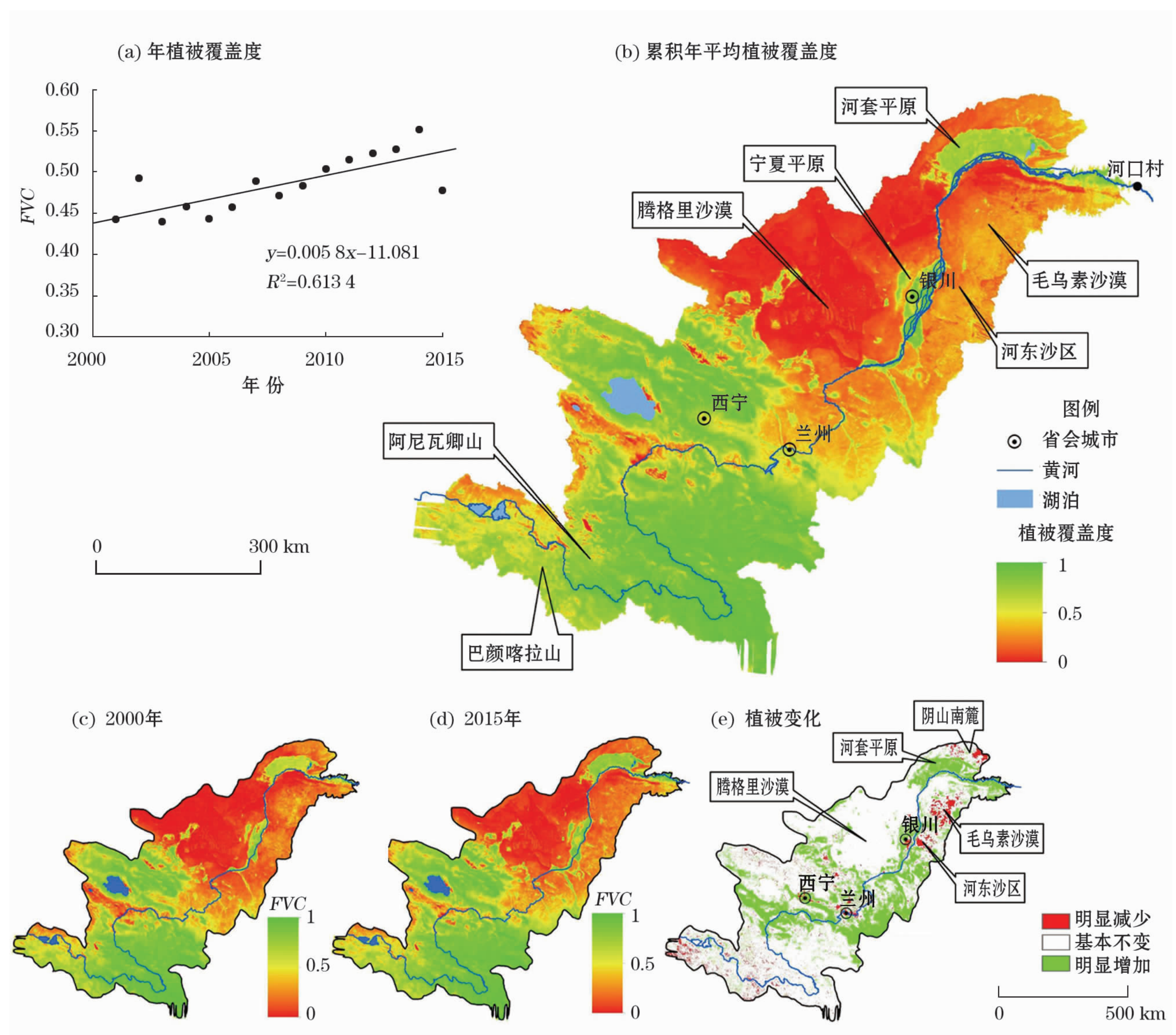
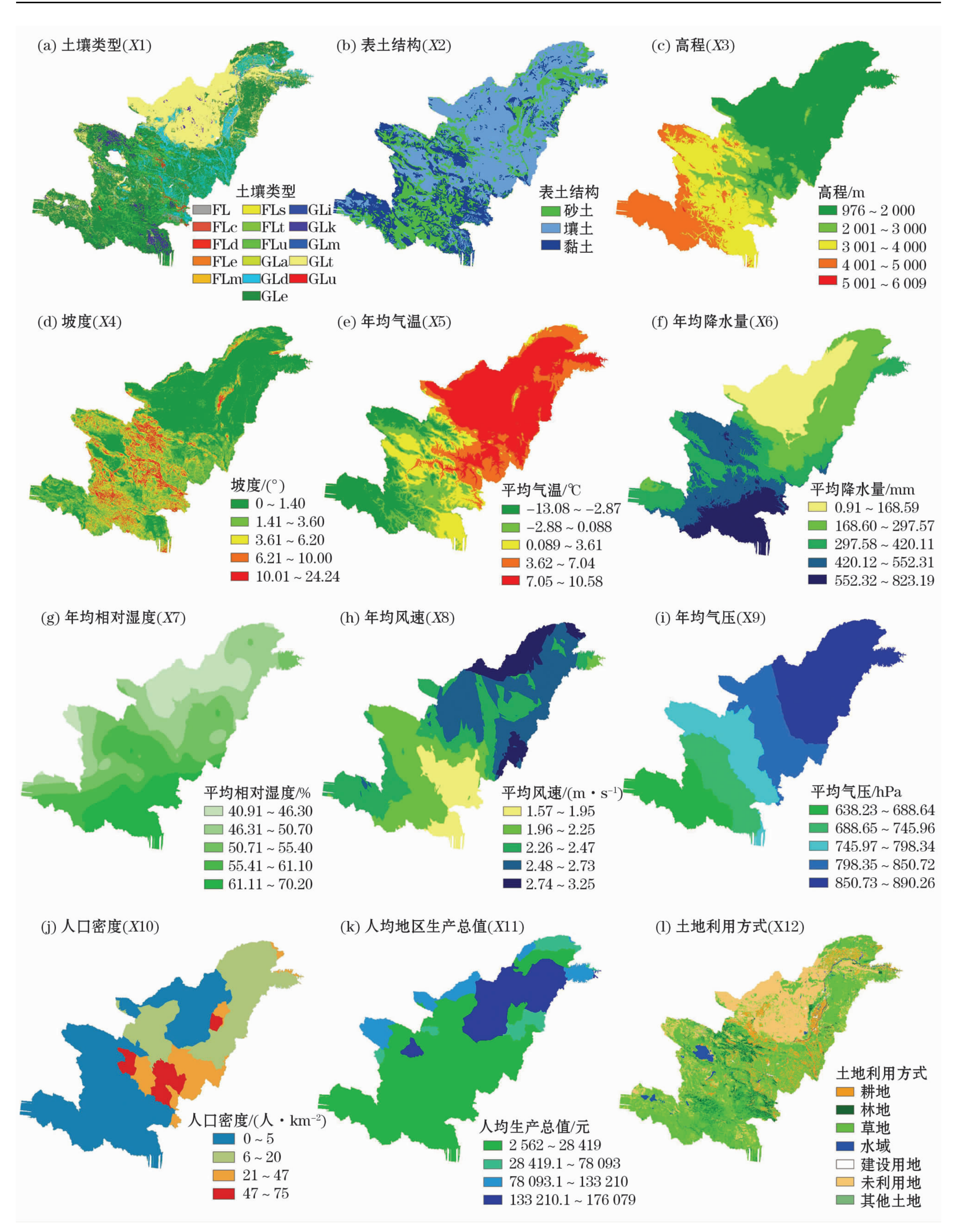


图 4 研究区植被覆盖变化

Fig. 4 Vegetation coverage in the study area



注：FLs：硅铝质潜育土，Gli：冰冻潜育土，FL：冲积土，FLt：酸性硫酸盐冲积土，GLk：钙质潜育土，FLc：石灰性冲积土，Flu：暗色冲积土，GLm：松软潜育土，FLd：不饱和冲积土，GLa：火山质潜育土，GLt：酸性硫酸盐潜育土，FLe：饱和冲积土，GLd：不饱和潜育土，Glu：暗色潜育土，FLm：松软冲积土，Gle：饱和潜育土。

图 5　地理探测因子类别化空间分布

Fig. 5　Spatial distribution of classified potential determinants

区的存在,植物生长总体状况较差,河套地区和银川周边地区凭借其平原优势植物生长状况较好。

3.2 植被覆盖度空间分布的主导影响因子

以非气候类环境因素、气候类环境因素和人类活动因素等3大类共12个重分类后的代理变量为影响因子 *X*(图5),以研究区累积年平均植被覆盖度作为因变量 *Y*。使用格网点的方法对 *X*、*Y* 进行属性关联,格网点密度为10 km×10 km,考虑到水域的影响,对区内青海湖等水域不设采样点,研究区共有采样格网点5 301个。

使用地理探测器模型对 *FVC* 空间分布特征的影响因素进行分析,统计主导影响因子的 *q* 值(图6a)。同时,为了解不同因子之间对 *FVC* 空间分布影响是否存在显著差异,对影响因子做生态探测(图6b,0.05显著水平)。其中,年均降水量(*X6*)的 *q* 值最高(0.669),是 *FVC* 空间分布最主要的影响因素;且年平均相对湿度(*X7*)是第三重要的影响因素(*q* 值0.552),这与植被在干旱半干旱区水分是主要限制因素相吻合。研究区高程(*X3*, *q* 值0.563)变化较大(976~6 009 m),高程作为次重要的影响因素,且与降水在生态检测中为 *Y*,表示对于 *FVC* 的空间分布而言,降水和高程存在显著差异,即高程和降水对于 *FVC* 的空间分布影响的机理不同。而年平均气温(*X5*, *q* 值0.533)和年平均气压(*X9*, *q* 值0.501)虽然 *q* 值相对较高,但考虑到本区的高程变化对气温和气压的影响,可以认为,气温、气压对 *FVC* 空间分布的影响实质是高程的间接作用。

土壤类型(*X1*, *q* 值0.436)对于研究区 *FVC* 空间分布的解释力中等,原因可能是本区植被类型相对单一,以草地为主(图5l),受土壤因素影响相对较小。坡度(*X4*,*q* 值0.220)除了中部和南部山区变化较大外,总体变化范围较小(0°~26.87°),对 *FVC* 空间分布的解释力相对较弱。而人口密度、人均地区生产总值和土地利用方式等人类活动因素(*X10*~*X12*),*q* 值在0.235~0.339,对 *FVC* 空间分布的解释力较弱。

综合各因子,从 *FVC* 空间分布特征分析,降水是主导的影响因子,而其他影响因子的作用则存在区域差异。本区腾格里沙漠以南、兰州西南方向有巴颜喀拉山、阿尼玛卿山等一系列的呈西北—东南走向的高山,受高程(*X3*,*q* 值0.563)变化影响,气压(*X9*,*q* 值0.501)呈现出东北—西南递减的特征(图5h),降水(*X6*,*q* 值0.669)呈现从东南到西北的递减梯度变化;同时湿润气流受到山体的抬升和降温作用,从而在迎风坡形成降雨区,有利于植物生长,植被覆盖度较高。而本区中部和东北部地区,高程和坡度变化相对较小,*FVC* 空间分布主要受降水量、湿度、土壤类型、土地利用方式等因子限制,且多沙漠和沙地分布,除黄河沿岸的宁夏平原和河套平原外,其他地区 *FVC* 较低。总体上,对研究区 *FVC* 空间分布的影响:气候类环境因素>非气候类环境因素>人类活动因素。

3.3 影响因素的交互作用

研究影响因素间交互作用目的是了解当两种影响因子同时作用于因变量 *Y* 时,其交互作用对因变量 *Y* 的解释程度。依据交互作用结果的不同,一般存在5种情况,分别为非线性减弱{$q(X1 \cap X2) <$ Min[$q(X1)$, $q(X2)$]}、单因子非线性减弱{Min[$q(X1)$, $q(X2)$] $< q(X1 \cap X2) <$ Max[$q(X1)$, $q(X2)$]}、双因子增强{[$q(X1 \cap X2) >$ Max[$q(X1)$,

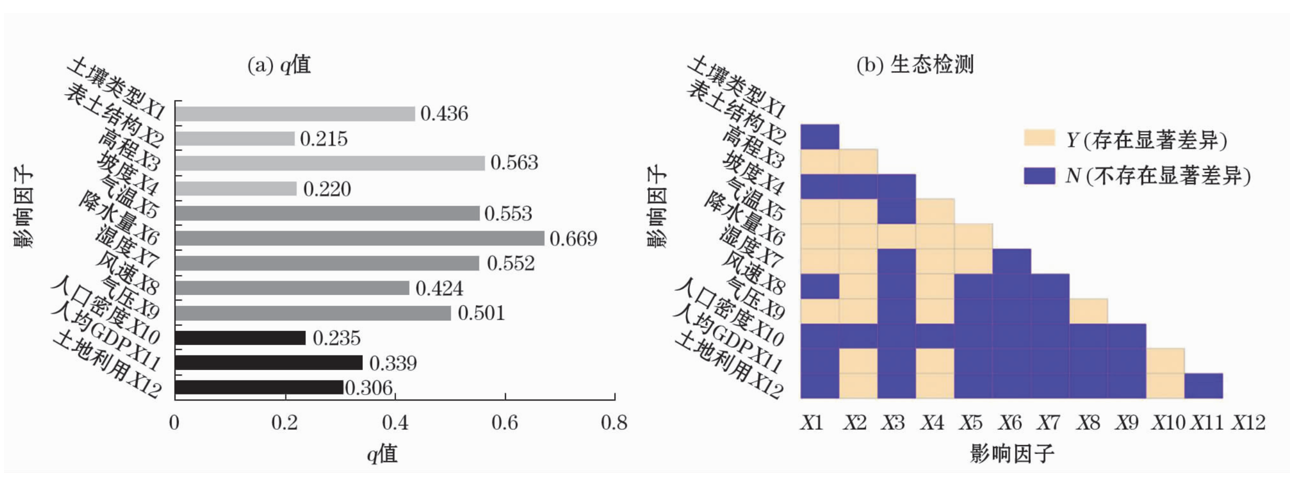


图6 *FVC* 空间分布影响解释力指标及生态探测

Fig. 6 Power of determinants of *FVC* spatial distribution & ecological detector

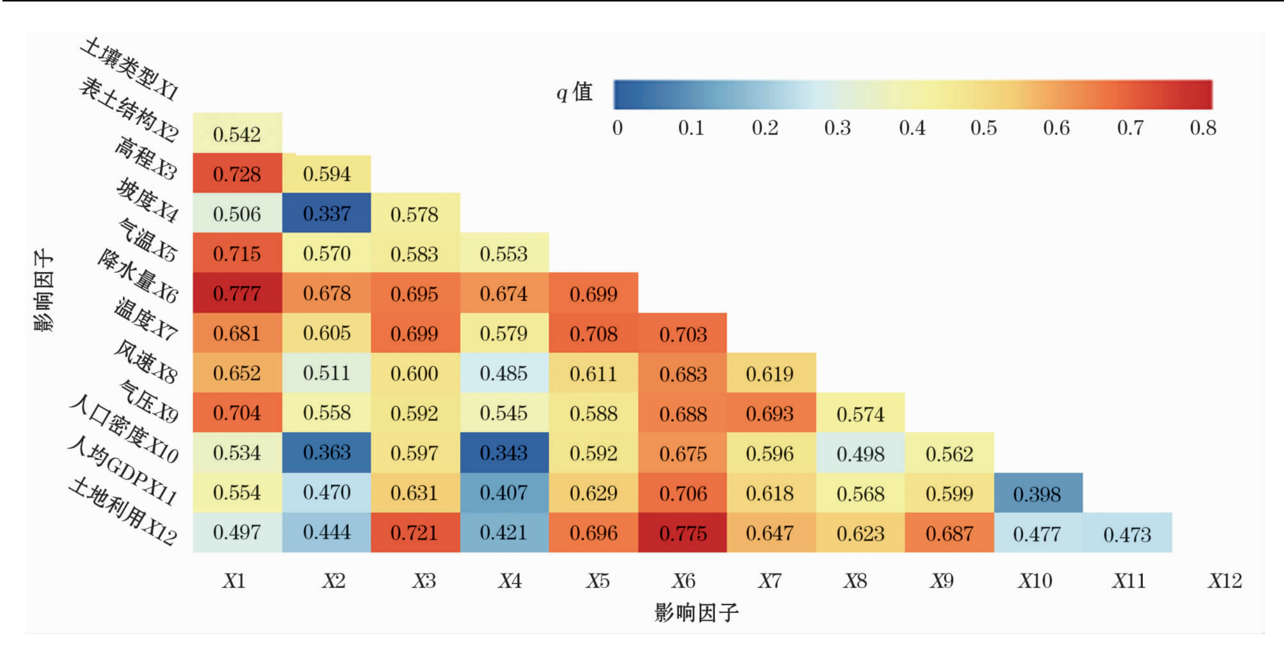


图7 交互探测中影响因子的解释力

Fig. 7 Power of determinants in interaction

$q(X2)]\}$独立$[q(X1\cap X2)=q(X1)+q(X2)]$和非线性增强$[q(X1\cap X2)>q(X1)+q(X2)]$。对黄河上游的 *FVC* 空间分布影响因素进行交互探测检验(图7)。

结果表明,任意两种影响因素的交互作用基本都表现为双因子增强。其中,土壤类型∩降水量($X1\cap X6$, q 值 0.777)和降水量∩土地利用方式($X6\cap X12$, q 值 0.775)的交互作用对研究区 *FVC* 空间分布特征具有最强的解释力。结合 3.2 的分析,说明以降水量为主导,降水分别和土壤类型、土地利用方式的共同作用,对 *FVC* 空间分布的影响作用最大。由于气温、气压和高程间存在规律性且生态检测为 *N*,即气温、气压和高程对 *FVC* 空间分布的影响具有相同的机理,所以土壤类型∩高程($X1\cap X3$, q 值 0.728)、土壤类型∩气温($X1\cap X5$, q 值 0.715)和土壤类型∩气压($X1\cap X9$, q 值 0.704)的作用机理相同且解释力相近;同理,气温∩降水($X5\cap X6$, q 值 0.699)和高程∩降水($X3\cap X6$, q 值 0.695)、气温∩湿度($X5\cap X7$, q 值 0.708)和高程∩湿度($X3\cap X7$, q 值 0.699)存在相同的作用机理。降水和湿度具有空间分布的一致性(图4f、4g),且对 *FVC* 的空间分布的影响不具有显著差异(生态检测为 *N*),说明降水和湿度对 *FVC* 空间分布的作用机理相似,但其交互作用($X6\cap X7$, q 值 0.704)具有更强的解释力。由以上的分析可知,对 *FVC* 空间分布特征的影响主要在于降水、高程(进一步影响了气温和气压)、土地利用方式和土壤类型间的交互作用。并且可以发现土地利用方式和土壤类型在主导因子探测中解释力相对较弱,而在与其他因子的交互作用中具有较强的解释力,说明土壤类型和土地利用方式的影响在满足一定的高程、降水和湿度情况下才能体现出来。

值得注意的是降水∩土地利用方式($X6\cap X12$, q 值 0.775)、高程∩土地利用方式($X3\cap X12$, q 值 0.715)和降水∩人均地区生产总值($X6\cap X11$, q 值 0.706)等环境因素和人类活动因素的交互作用的解释力较强,而在主导影响因子的分析中人类活动因素的驱动作用并不明显(单因子 q 值 0.235 ~ 0.339),这表明人类活动单因子的空间分布特征对 *FVC* 空间分布影响较弱,而在与降水和高程等环境因子的共同作用下,则更容易影响 *FVC* 的空间分布。

4 讨论和结论

4.1 讨论

本研究利用 *FVC* 数据探讨了黄河上游地区 *FVC* 的空间分布状况,使用地理探测器工具定量分析了 *FVC* 空间分布的主要影响因素和不同因素间的交互作用。总体来看,研究区多年来 *FVC* 生长状况趋于改善[4-6],空间分布特征变化不大。其中腾格里沙漠、兰州以北,西宁西北等地区人为干预较

少,基本保持稳定;河套平原、宁夏平原、西宁南部、兰州东南部则以增加为主,这可能与中国近些年施行的退耕还林还草等生态保护措施有关;毛乌素沙漠和河东沙区受人为因素的影响较大[28],植被覆盖度下降明显,而西南山区则因生态建设工程的缺失[29],*FVC* 呈现退化的趋势;阴山南麓作为我国生态环境高度敏感区[28],土地退化、沙漠化严重,植被覆盖度降低。

研究中人类活动因素对 *FVC* 空间分布的影响相对较弱,而与其他因子的交互作用具有更强的解释力。主要原因可能有以下几点。首先,人类活动因素受气候、地形等因素的综合影响,主要分布于低海拔、临近水域且降雨量相对较多的地区,尤其在西宁、兰州和银川等省会城市人口密集区,人类活动较为集中,而在西南部高海拔山区和北部腾格里沙漠等区域人口密度较少,人类活动影响较弱(图 5j),即人类活动和 *FVC* 的空间分布特征不一致;其次,我国的生态保护政策主要作用在于减少人为活动对自然生态的干扰,而一系列生态建设工程使得人类活动与 *FVC* 空间分布的关系更为复杂,破坏了人类自然发展条件下的空间分布规律;最后,人类活动在不同的气候条件下对生态环境表现出正负不同的影响作用[29],如在气候条件利好的情况下对生态环境表现为正影响,而在研究区西南部阿尼玛卿山等山脉及周边地区,水热条件较差,生态建设工程缺失,人类活动则主要表现为负影响。所以,本文所述的人类活动更多的体现在人类的空间活动上,而对退耕还林还草、封山育林等生态保护作用的体现相对较差,但当人类活动和降水、高程等因子交互时,其作用则能得到很好地体现。

本文研究重点在于研究区 *FVC* 空间分布的影响因素,考虑了多种因子对 *FVC* 空间分布的影响作用。虽然研究区 *FVC* 总体空间分布比较稳定,但局部地区仍发生了变化,所以,在接下来的研究中可以使用不同因子的变化特征进一步探讨研究区 *FVC* 变化的驱动因素。

4.2 结论

(1) 近年来,黄河上游植被覆盖度(*FVC*)总体上以改善为主,局部 *FVC* 存在变化,但 *FVC* 整体的空间分布特征比较稳定。

(2) 降水是黄河上游地区 *FVC* 空间分布的主要影响因素,其他影响因子的作用则存在区域差异。表现为研究区西南部受到地形和气压的综合作用降水量较高,植物生长状况较好;而中部和东北部地区地形因素变化较小,*FVC* 主要受到降水、湿度、土地利用方式下垫面土壤类型等因子限制,形成了除河套平原和宁夏平原 *FVC* 较高外,其他地区较低的特点。

(3) 降水量分别与土壤类型、土地利用方式的交互作用对研究区 *FVC* 空间分布起主导作用。且土壤类型和土地利用方式的影响只有在一定的高程、降水和湿度等因素的影响下才得以体现。

(4) 总体来看,对 *FVC* 空间分布的影响:气候类环境因素 > 非气候类环境因素 > 人类活动因素。虽然人类活动单因子对研究区 *FVC* 空间分布的解释力不强,但与降水、高程等环境因子的共同作用能够更充分地解释 *FVC* 空间分布。

(5) 降水、土壤、高程和土地利用方式等共同作用,主导了 *FVC* 的空间分布特征。但就目前来讲,土壤和高程因素可干预性较小,所以,对该地区的生态恢复应重点放在降水的充分利用和土地利用方式改进上,根据降水和土地利用的空间分布特点,提出合理的管控和治理措施。

参考文献(References):

〔1〕 Sellers Piers, Schimel David. Remote sensing of the land biosphere and biogeochemistry in the EOS era: Science priorities, methods and implementation-EOS land biosphere and biogeochemical cycles panels〔J〕. Global & Planetary Change, 1993, 7(4): 279 – 297.

〔2〕 Jiapaer Guli, Chen Xi, Bao Anming. A comparison of methods for estimating fractional vegetation cover in arid regions〔J〕. Agricultural & Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1 698 – 1 710.

〔3〕 陈桂琛,刘光秀,Liu Kambiu,等. 黄河上游地区植被特征及其与毗邻地区的关系〔C〕//中国科学院西北高原生物研究所. 高原生物学集刊,1999,14:11 – 18.〔Chen Guichen, Liu Guangxiu, Liu Kambiu, et al. Vegetation characteristics of the upper Yellow River and its relationship with adjacent areas〔C〕// Institute of Northwestern Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences. Acta Biologica Plateau Sinica, 1999, 14: 11 – 18.〕

〔4〕 杨胜天,刘昌明,孙睿. 近 20 年来黄河流域植被覆盖变化分析〔J〕. 地理学报,2002,57(6):679 – 684.〔Yang Shengtian, Liu Changming, Sun Rui. The vegetation cover over last 20 years in Yellow River Basin〔J〕. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(6): 679 – 684.〕

〔5〕 贺振,贺俊平. 基于 SPOT-VGT 的黄河流域植被覆盖时空演变〔J〕. 生态环境学报,2012,21(10):1 655 – 1 659.〔He Zheng, He Junping. Spatio-temporal variation of vegetation cover based on SPOT-VGT in Yellow River Basin〔J〕. Ecology and Environment Sciences, 2012, 21(10): 1 655 – 1 659.〕

[6] Cao Ran, Jiang Weiguo, Yuan Lihua, et al. Inter-annual variations in vegetation and their response to climatic factors in the upper catchments of the Yellow River from 2000 to 2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(6): 963 – 979.

[7] Wang Houjie, Yang Zuosheng, Saito Yoshiki, et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950 – 2005): Impacts of climate change and human activities[J]. Global & Planetary Change, 2007, 57(3): 331 – 354.

[8] 邓兴耀,姚俊强,刘志辉. 基于 GIMMS NDVI 的中亚干旱区植被覆盖时空变化[J]. 干旱区研究,2017,34(1):10 – 19. [Deng Xingyao, Yao Junqiang, Liu Zhihui. spatiotemporal dynamic change of vegetation coverage in arid regions in Central Asia based on GIMMS NDVI[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 10 – 19.]

[9] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报,2013,33(24):7 798 – 7 806. [Yuan Lihua, Jiang Weiguo, Shen Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7 798 – 7 806.]

[10] 陈登魁,马超,王夏冰,等. 1982—2015 年可可西里 NDVI 变化特征及其气候响应[J]. 干旱区研究,2018,34(6):1 410 – 1 417. [Chen Dengkui, Ma Chao, Wang Xiabing, et al. Variation of NDVI and its response to climate change in Hoh Xil during the period of 1982 – 2015[J]. Arid Zone Research, 2018, 34(6): 1 410 – 1 417.]

[11] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116 – 134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116 – 134.]

[12] Shrestha Anil, Luo Wei. Analysis of groundwater nitrate contamination in the Central Valley: Comparison of the geodetector method, principal component analysis and geographically weighted regression[J]. International Journal of Geo-Information, 2017, 6(10): 297.

[13] Du Ziqiang, Xu Xiaoming, Zhang Hong, et al. Geographical detector-based identification of the impact of major determinants on aeolian desertification risk[J]. Plos One, 2016, 11(3), e151331.

[14] Liang Peng, Yang Xiaoping. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors[J]. Catena, 2016, 145: 321 – 333.

[15] 李佳洺,陆大道,徐成东,等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J]. 地理学报,2017,72(1):148 – 160. [Li Jiaming, Lu Dadao, Xu Chengdong, et al. Spatial heterogeneity and its changes of population on the two sides of Hu Line[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 148 – 160.]

[16] 董玉祥,徐茜,杨忍,等. 基于地理探测器的中国陆地热带北界探讨[J]. 地理学报,2017,72(1):135 – 147. [Dong Yuxiang, Xu Qiang, Yang Ren, et al. Delineation of the northern border of the tropical zone of China's mainland using Geodetector[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 135 – 147.]

[17] 廖颖,王心源,周俊明. 基于地理探测器的大熊猫生境适宜度评价模型及验证[J]. 地球信息科学学报,2016,18(6):767 – 778. [Liao Ying, Wang Xinyuan, Zhou Junming. Suitability assessment and validation of giant panda habitat based on geographical detector[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(6): 767 – 778.]

[18] Wang Xinge, Xi Jianchao, Yang Dongyang, et al. Spatial differentiation of rural touristization and its determinants in China: A Geo-detector-based case study of Yesanpo scenic area[J]. Journal of Resources and Ecology, 2016, 7(6): 464 – 471.

[19] 湛东升,张文忠,余建辉,等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理[J]. 地理科学进展,2015,34(8):966 – 975. [Zhan Dongsheng, Zhang Wenzhong, Yu Jianhui, et al. Analysis of influencing mechanism of residents' livability satisfaction in Beijing using geographical detector[J]. Progress in Geography, 2015, 34(8): 966 – 975.]

[20] 丁悦,蔡建明,任周鹏,等. 基于地理探测器的国家级经济技术开发区经济增长率空间分异及影响因素[J]. 地理科学进展,2014,33(5):657 – 666. [Ding Yue, Cai Jianming, Ren Zhou peng, et al. Spatial disparities of economic growth rate of China's National-level ETDZs and their determinants based on geographical detector analysis[J]. Progress in Geography, 2014, 33(5): 657 – 666.]

[21] Wang Jinfeng, Li Xinhui, Christakos George, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107 – 127.

[22] 通拉嘎,徐新良,付颖,等. 地理环境因子对螺情影响的探测分析[J]. 地理科学进展,2014,33(5):625 – 635. [Tong Laga, Xu Xinliang, Fu Ying, et al. Impact of environmental factors on snail distribution using geographical detector model[J]. Progress in Geography, 2014, 33(5): 625 – 635.]

[23] Huang Jixia, Wang Jinfeng, Bo Yanchen, et al. Identification of health risks of hand, foot and mouth disease in China using the geographical detector technique[J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2014, 11(3): 3 407 – 3 423.

[24] 谢秋霞,孙林,韦晶,等. 基于遥感估算方法的干旱区植被覆盖度适应性评价[J]. 生态学杂志,2016,35(4):1 117 – 1 124. [Xie Qiuxia, Sun Lin, Wei Jing, et al. Adaptive evaluation of vegetation coverage estimation in arid region based on remote sensing technology[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(4): 1 117 – 1 124.]

[25] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2013. [Zhao Yingshi. Principles and Methods of Analysis of Remote Sensing Application[M]. Beijing: Science Press, 2013.]

[26] 刘志红,Li Lingtao,Tim R Mcvicar,等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象,2008,34(2):92 – 100. [Liu Zhihong, Li Lingtao, Tim R Mcvicar, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUS-

PLINN〔J〕. Meterological Monthly,2008,34(2):92－100.〕

〔27〕Chang Kang-Tsung,张康聪,陈建飞. 地理信息系统导论〔M〕. 北京:科学出版社,2016.〔Chang Kang-Tsung,Zhang Kangcong,Chen Jianfei. Introduction to Geographic Information Systems〔M〕. Beijing:Science Press,2016.〕

〔28〕刘军会,邹长新,高吉喜,等. 中国生态环境脆弱区范围界定〔J〕. 生物多样性,2015,23(6):725－732.〔Liu Junhui,Zou Zhangxin,Gao Jixi,et al. Location determination of ecologically vulnerable regions in China〔J〕. Biodiversity Science,2015,23(6):725－732.〕

〔29〕李辉霞,刘国华,傅伯杰. 基于NDVI的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究〔J〕. 生态学报,2011,31(19):5 495－5 504.〔Li Huixia,Liu Guohua,Fu Bojie. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2011,31(19):5 495－5 504.〕

Spatial Distribution of Vegetation Coverage and Its Affecting Factors in the Upper Reaches of the Yellow River

PEI Zhi-lin[1,2], YANG Qin-ke[1,3], WANG Chun-mei[3], PANG Guo-wei[3], YANG Li-hua[1,2]

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources Yangling* 712100, *Shaanxi*, *China*;

2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*;

3. *College of Urban and Environment Sciences*, *Northwest University*, *Xi'an* 710127, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: The ecosystem in the upper reaches of the Yellow River is fragile, and it is affected by the unique ecological environment and relatively simple vegetation types. The distribution of fractional vegetation cover (*FVC*) and its driving factors provide a reference for local vegetation protection. In this paper, the monthly data of MODIS1M NDVI (2000－2015) were used to calculate the maximum *FVC* in the upper reaches of the Yellow River and analyze its distribution and characteristics. Moreover, the corresponding proxy variables were used to quantitatively study the affecting factors of *FVC* by using the geographical detector (Geodetector) model based on the statistics theory and considering the topographical, geological and climatic factors as well as human activities. The study showed that: ① The *FVC* in the upper reaches of the Yellow River was improved. The spatial distribution of *FVC* was stable even if there was a slight fluctuation; ② The distribution of *FVC* was mainly affected by annual precipitation. There were some regional differences in the effects of other factors, for example, the distribution of *FVC* in the southwest of the study area was subject to the joint effect of topography and pressure, the effects of topographic factors in the central and northeast regions were relatively low, and the *FVC* was mainly subject to precipitation, humidity, land use types, soil types and underlying surface; ③ The interaction between the annual precipitation and the soil types and land use types was dominant to affect the spatial distribution of *FVC*; ④ Holistically, the factors affecting the spatial distribution of *FVC* were in an order of climatic environment factors > non-climatic environmental factors > human activities. The interaction of human activities with environmental factors (such as precipitation) could be used to fully explain the spatial distribution of *FVC*; ⑤ In the ecological restoration in this area, the full utilization of precipitation and the improvement of land use ways should be focused on.

Key words: fractional vegetation cover (*FVC*); spatial stratified heterogeneity; affecting factor; Geodetector; upper reaches of the Yellow River